

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОМПЕНСАЦИОННОГО ФАЗОМАГНЕТОМЕТРА

Л. М. АНАНЬЕВ, С. Ф. ВАСИЛЕВСКИЙ

(Представлена научным семинаром научно-исследовательского института ядерной физики, электроники и автоматики при ТПИ)

При настройке бетатронов значительная часть затрат труда и времени приходится на измерение и исправление фазовой структуры магнитного поля. В настоящее время имеются некоторые достижения в области измерений фазовых неоднородностей (ФН) магнитного поля бетатронов [1—5]. Однако существующие методы измерения недостаточно полно удовлетворяют возросшим требованиям бетатроностроения и нуждаются в усовершенствовании.

В связи с широким внедрением бетатронов в промышленность и организацией их мелкосерийного производства стала актуальной задача повышения производительности всех настроечных работ, в том числе работ, связанных с измерением и исправлением фазовой структуры магнитного поля, которые занимают значительную часть времени при настройке электромагнита ускорителя.

Необходимость определять годность электромагнитов до начала настроечных работ предъявляет повышенные требования к точности аппаратуры.

В настоящее время известны дифференциальные и компенсационные методы измерения ФН.

Необходимо отметить, что при измерениях ФН наиболее распространенным является компенсационный метод, основанный на подпитке постоянным током датчиков нуля поля. Поэтому нами был подвергнут наиболее полному критическому анализу именно этот метод.

Метод основан на фиксации момента прохождения магнитного поля через нулевое значение и компенсации сдвига между сигналами датчиков нуля поля путем подпитки постоянным током контрольного датчика [1—2]. Сущность компенсационного метода заключается в следующем.

В поле бетатрона устанавливают два включенных встречно датчика нуля поля, контрольный (неподвижный) и измерительный (подвижный) (рис. 1). Контрольный датчик подпитывается постоянным током, регулируемым сопротивлением R . Индикатором служит осциллограф $K. O.$ Изменяя ток подпитки, добиваются совмещения импульсов контрольного и измерительного датчиков нуля поля и по показаниям прибора в момент компенсации определяют сдвиг фаз.

С целью исследования характеристик компенсационного метода, его недостатков и путей их устранения был разработан и изготовлен

прибор — компенсационный фазомагнетометр, полная принципиальная схема которого представлена на рис. 2.

Прибор включает два источника питания и измерительную цепь. Первый источник напряжения (диоды $D_1 \div D_4$) используется для основной подпитки датчиков нуля поля.

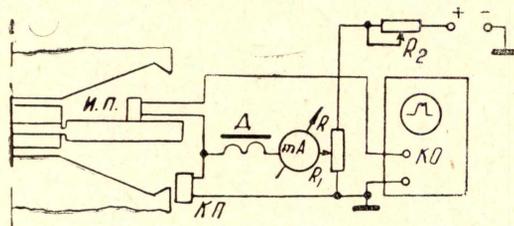


Рис. 1. Компенсационный метод измерения фазовой неоднородности магнитного поля.

Второй выпрямитель (диоды $D_5 \div D_8$) предназначен для вспомогательной подпитки, компенсирующей постоянный фазовый сдвиг. Регулировка тока подпитки осуществляется грубо реостатами R_7, R_8 и плавно потенциометрами R_5, R_6 . Для изменения направления тока через обмотку датчика применены переключатели полярности $П_1, П_2$.

Сигнальные обмотки контрольного и измерительного датчиков включены через потенциометры R_9, R_{10} , с помощью которых можно добиваться оптимального соотношения уровней сигналов на экране осциллографа.

Изменение пределов измерения тока осуществляется с помощью галетного переключателя ПП путем переключения шунтов микроамперметра М-24. Одновременно с целью изменения пределов регулировки тока подпитки в разных положениях переключателя ПП изменяется напряжение на вторичной обмотке силового трансформатора за счет переключателя числа витков вторичной обмотки.

В положении 1—1 переключателей $П_3, П_4$ измеряется ток основной подпитки, в положении 2—2 тем же прибором измеряется ток вспомогательной подпитки.

Выводы датчиков распаяны на шестиштырьковый разъем Шр-6. В качестве датчиков нуля поля использованы пермоллоевые пик-трансформаторные датчики. Контрольный датчик имеет две обмотки: одну для основной подпитки, вторую для вспомогательной подпитки, компенсирующей постоянный фазовый сдвиг.

Экспериментально определенные основные технические характеристики прибора следующие:

1. Чувствительность 0,25 эрстед/дел.
2. Пределы регулировки тока:

- I предел 0—0,3 ма,
- II предел 0—3 ма,
- III предел 0—30 ма,
- IV предел 0—300 ма.

3. Пределы измерения фазовой неоднородности от 1 до 50 эрстед.

Для оценки компенсационного метода наибольший интерес представляют его погрешности и производительность.

Исследование погрешностей фазомагнетометра показало, что существует значительное число источников погрешностей. Из них можно выделить погрешности из-за неточности установки измерительного диска, из-за наведенной э.д.с., неточности градуировки датчиков и прибора, измеряющего ток подпитки, и др.

Основные источники погрешностей, их влияние на точность измерений и пути устранения рассмотрены ниже.

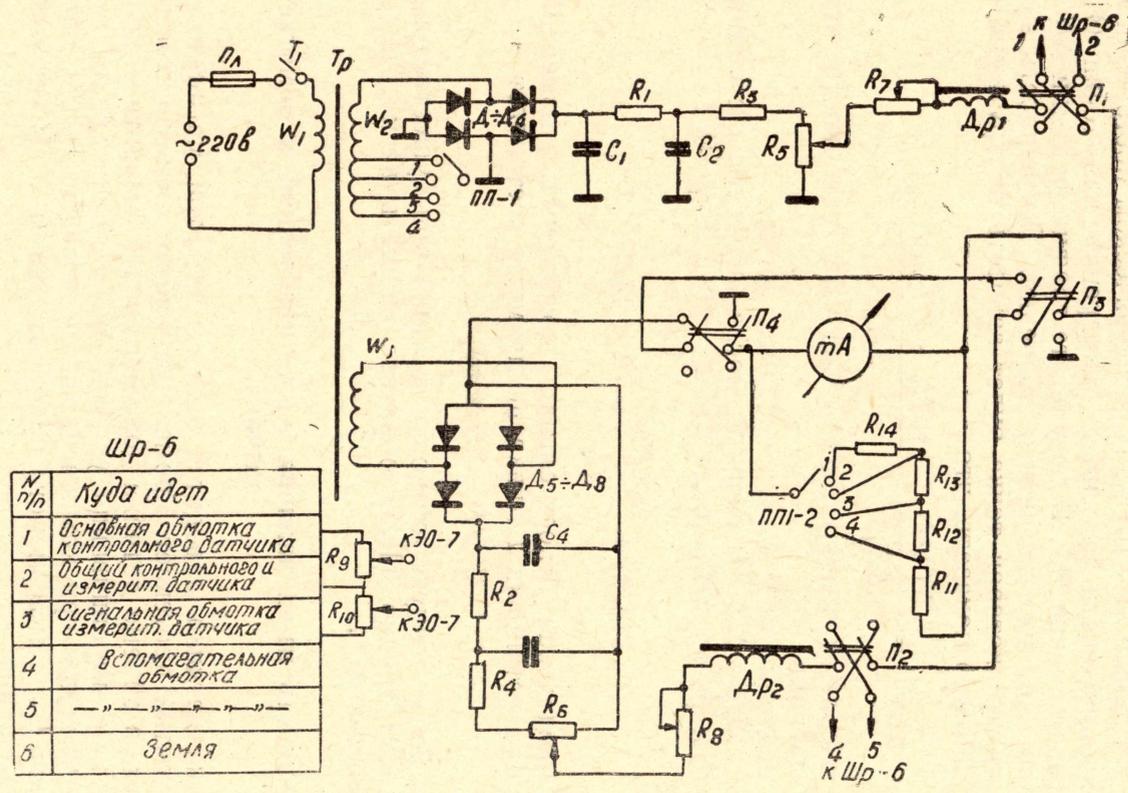


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментального компенсационного фазомагнетометра

Неточность установки датчика по азимуту

Для перемещения измерительного датчика по азимуту его устанавливают на диск с метками азимута в градусах. При установке датчика на некоторый азимут Θ_i путем вращения диска могут возникнуть погрешности установки из-за неточности центровки диска, неточности нанесения меток градусов, неточности установки нужной метки против указателя и т. д. При установке диска в точках с интервалом в 10° неточность установки $\Delta\Theta_i$ составляет $(0,5-1)^\circ$, т. е. относительная погрешность установки $(5-10)\%$. При графическом построении кривой фазовой неоднородности результат измерения для точки $\Theta_i \pm \Delta\Theta$ откладывается для точки Θ_i . В результате график функции $\Delta H = f(\Theta)$ проходит выше или ниже истинного значения. Погрешность значения неоднородности в некоторой точке будет зависеть от крутизны кривой в этой точке. Можно показать, что

$$\delta(\Delta H) = \frac{\Delta(\Delta H)}{\Delta H_i} = \frac{(\Delta H_i - \Delta H_{i-1})}{\Delta H_i} \cdot \delta\Theta, \quad (1)$$

где $\Delta(\Delta H)$ — абсолютная погрешность ФН из-за неточности установки датчика,

$\Delta H_i, \Delta H_{i-1}$ — значение ФН в двух соседних точках.

Разность $(\Delta H_i - \Delta H_{i-1})$ равна 0, когда ФН в двух соседних точках одинакова и равна ΔH_i , когда $\Delta H_{i-1} = 0$, а $\Delta H_i \neq 0$.

Поэтому

$$\delta(\Delta H) = \frac{\Delta(\Delta H)}{\Delta H_i} = (0 \div 1) \delta\Theta. \quad (2)$$

Значит, предельная относительная погрешность измерения ФН из-за неточности установки датчика по азимуту составляет

$$\delta(\Delta H) = (5 \div 10)\%.$$

Осуществить более точную установку датчика при существующих конструкциях диска трудно. Целесообразнее вращать диск с постоянной угловой скоростью ω_g .

Погрешность из-за наличия э.д.с., наведенной в обмотке датчика

В обмотке датчика наводится э.д.с. с частотой магнитного поля. По цепи подпитки протекает, кроме постоянного, переменный ток, который создает в объеме датчика дополнительное магнитное поле H' .

В результате выравнивания уровней сигналов на экране осциллографа осуществляется при компенсирующем поле $H_{\sim} + H'_{\sim}$, отличающемся от поля H_{\sim} , измеряемого прибором на H'_{\sim} . Появляется погрешность измерения

$$\delta(\Delta H) = \frac{H'_{\sim}}{H_{\sim} + H'_{\sim}} = \frac{1}{1 + \frac{i_g R_1 (R_1 + R_2)}{e R_2}}, \quad (3)$$

где e — э.д.с., наведенная в обмотке датчика,

i_g — ток через делитель (потенциометр R),

R_1 — сопротивление нижнего плеча делителя (рис. 1),

R_2 — сопротивление реостата в цепи подпитки.

Из формулы (3) видно, что погрешность особенно велика при малых токах подпитки, когда R_1 мало. Для уменьшения ошибки измерения надо уменьшать величину наведенной э.д.с. e . Для этого целесообразно

конструировать датчики с малым поперечным сечением и небольшим числом витков.

Ток делителя i_g нецелесообразно увеличивать более $50 \div 100$ ма, так как возрастает мощность и габариты выпрямителя и резистора делителя R .

Для уменьшения влияния наведенной э.д.с. необходимо включение дросселя в цепи подпитки. При наличии дросселя L относительная погрешность будет

$$\delta(\Delta H) = \frac{1}{1 + \frac{i_g R_1 \cdot \sqrt{(R_1 + R_2) + (\omega L)^2}}{e R_2}}. \quad (4)$$

При $\omega L \gg R_2$ погрешность будет мала. Влияние индуктивности еще более увеличивается, так как сдвигается фаза переменного тока и в пределе нуль основного поля может совпасть с нулем дополнительного поля от наведенной э.д.с. При этом рекомендуется проводить измерение при возможно большем введенном потенциометре R (увеличивать R_1), а регулировку тока подпитки осуществлять больше реостатом R_2 . Еще лучшие результаты можно получить, если сопротивление делителя R_1 оставить постоянным, а регулировку тока подпитки i_n осуществлять либо регулировкой напряжения на обмотке силового трансформатора, либо применением управляемого выпрямителя.

Влияние большой постоянной составляющей ФН

Из-за ограниченности междуполусного пространства электромагнита бетатрона не всегда удается расположить контрольный и измерительный датчик на одинаковом радиусе. При расположении датчиков нуля поля на разных радиусах в измеренной кривой ФН появляются постоянная $\Delta H_{=}$ и переменная ΔH_{\sim} составляющие. Соотношение $\Delta H_{=} / \Delta H_{\sim}$ зависит от расположения датчиков и может быть больше 1. В этом случае при измерении ФН погрешность определения переменной составляющей будет большей даже при использовании высокоточных приборов

$$\delta(\Delta H)_{\sim} = \left[\frac{\Delta H_{=} + \Delta H_{\sim}}{\Delta H_{\sim}} \right] \delta(\Delta H)_{\text{пр}}, \quad (5)$$

где $\delta(\Delta H)_{\text{пр}}$ — относительная погрешность прибора.

Для уменьшения влияния большой $\Delta H_{=}$ нами применялась дополнительная обмотка на датчике, по которой проходил ток, компенсирующий $\Delta H_{=}$. При этом точность измерения ΔH_{\sim} увеличивалась.

Устранить влияние постоянной составляющей ФН возможно также способом [7], заключающимся в том, что оба датчика (контрольный и измерительный) устанавливаются на подвижный диск на одном радиусе и под углом $\Delta\theta = \frac{360}{n}$ (n — число точек измерения).

Последовательно перемещая диск на этот же угол $\Delta\theta$ и измеряя частичные разности фаз φ_i , можно получить кривую ФН. Истинный сдвиг фазы в любой i -той точке поля равен сумме измеренных частичных разностей фаз.

$$\varphi_i = \sum_{i=1}^i \varphi_i. \quad (6)$$

За счет того, что датчики расположены на одинаковом расстоянии от центра и небольшом азимуте друг от друга, постоянная составляющая ФН значительно уменьшается.

Предельная абсолютная погрешность измерения в некоторой точке Θ_i будет равна

$$\Delta\varphi_i = \sum_{i=1}^i \Delta\bar{\varphi}_i = \delta\varphi_{\text{пр}} \cdot \sum_{i=1}^i |\bar{\varphi}_i|. \quad (7)$$

Однако предельная абсолютная ошибка $\Delta\varphi_i$ не может характеризовать точность этого метода, так как значение фазового сдвига в некоторой точке определяется в результате нескольких измерений. При многих измерениях равно вероятно появление ошибок с противоположными знаками и, следовательно, возможность их взаимного уничтожения увеличивается. Поэтому правильнее оценивать погрешность по отклонению от наиболее вероятного значения измеряемой величины. Наиболее вероятным значением измеряемой величины является среднеарифметическое многих измерений, а абсолютная ошибка арифметической середины

$$\Delta\varphi_{\text{ср}} = \frac{\delta\varphi_{\text{пр}} \cdot \sum_{i=1}^i |\bar{\varphi}_i|}{\sqrt{n}}. \quad (8)$$

Сравнение выражений (8) и (5) показывает, что точность предложенного метода выше при условии

$$[\varphi_{\sim} + \varphi_{\sim}] > \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \sum_{i=1}^i |\bar{\varphi}_i|.$$

Выполнение этого условия зависит от формы кривой ФН. Оно выполняется при больших постоянных фазовых сдвигах.

Результаты теоретического анализа и экспериментальной проверки погрешностей представлены в табл. 1.

Таблица 1

Погрешности компенсационного метода измерения ФН

Источники погрешностей	Относительная погрешность (расчетная), %	Средняя относительная погрешность (эксперим.), %	Примечание
Неточность установки датчика по азимуту	5—10	8	Возможны субъективные ошибки
Наведенная э. д. с.			
а) без дросселя	10—30	15	
б) с дросселем	5—15	8,5	$L=0,5 \text{ гн}$
Погрешность прибора, измеряющего ток подпитки	1—2,5		Возможны субъективные ошибки
Погрешность графического построения	1—3	3	"
Градуировка датчиков	1,5—2,5	2	
Постоянная составляющая ФН	10—30	15	при $\Delta H_{\sim} := (1+5)\Delta H_{\sim}$
Итого:	23÷78	51	

В результате действия перечисленных источников погрешностей полная предельная ошибка достигает величины порядка 50—78%.

Кроме того, имеются условия для возникновения субъективных ошибок, что еще более снижает точность и объективность результатов измерения. Выполнение предложенных рекомендаций уменьшает погрешность метода, но точность измерений все еще остается недостаточной (порядка 25%).

Компенсационный метод с подпиткой датчиков нуля поля может быть рекомендован для предварительных оценочных измерений фазовой структуры электромагнитов ускорителей. При определении качества электромагнита и степени его соответствия допускам на отклонение фазовой структуры нужна более высокая точность измерений, поэтому необходимо разрабатывать другой принципиально новый метод измерения ФН.

Опыт работы с компенсационным фазомагнетометром показывает, что процесс измерения ФН требует больших затрат труда и времени, причем измерительные операции выполняют высококвалифицированные операторы.

С целью определения причин низкой производительности и путей их устранения был осуществлен анализ производительности процесса измерения ФН компенсационным методом.

Было установлено, что низкая производительность связана прежде всего с большим числом ручных и вычислительных операций, выполняемых экспериментатором при проведении измерений. К ним относятся:

- 1) установка датчика на нужном азимуте,
- 2) регулировка тока подпитки для выравнивания уровней сигналов на экране осциллографа,
- 3) считывание показаний прибора (микроамперметра),
- 4) регистрация показаний прибора,
- 5) построение графика кривой ФН,
- 6) гармонический анализ кривой ФН.

Результаты экспериментального определения затрат времени на измерение ФН (пункты 1, 2, 3, 4 перечисленных операций) представлены в табл. 2. Экспериментально определенное среднее время на цикл измерений (36 точек) составило 20 мин., причем в измерениях было занято 2 человека.

На построение графика кривой ФН затрачивается до 5 мин. Особенно велики затраты времени на процесс гармонического анализа кривой ФН. Хронометраж процесса определения амплитуд и фаз первых трех гармоник по методу К. П. Яковлева [6] показал, что на процесс гармонического анализа затрачивается до 30 мин.

Повышение производительности процесса измерения возможно только путем автоматизации ручных и вычислительных операций. Однако возможности автоматизации компенсационного метода ограничены. Так, для автоматизации операций 2, 3, 6 нужны устройства для считывания образов, что технически пока сложно.

В настоящее время существуют многочисленные приемы измерения путем преобразования измеряемой неэлектрической величины в электрический сигнал и использования средств электроники. Регистрация и анализ электрического сигнала при современном уровне техники не представляют особых трудностей. Для реализации достижений электроники следует изменить сам метод измерения ФН. Целесообразно измерение ФН осуществлять путем преобразования временного интервала (или фазы), задаваемого датчиками нуля поля, в напряжение без применения осциллографа или других средств визуальной индикации момента компенсации.

Для автоматизации процесса измерения перемещение датчика поля по азимуту также должно осуществляться автоматически. Это

возможно осуществить с помощью механической системы с приводом от электродвигателя.

Таблица 2

Производительность процесса измерения ФН компенсационным методом.

Число измерений n	Затраты времени на измерения в n точках t , мин.	Затраты времени на измерение в одной точке, $t_{1i} = \frac{t}{n}$	Среднее время на 1 точку, $t_{cp} = \frac{1}{13} \sum_{i=1}^{13} t_{1i}$	Среднее время на цикл (36 точек), $t_{ц} = 36 t_{cp}$	Примечание
30	25	0,83	0,56	20	В измерениях участвовало 2 человека
15	10	0,67			
19	7	0,37			
9	6	0,67			
16	10	0,62			
8	7	0,82			
36	16	0,44			
18	14	0,78			
11	9	0,82			
18	13	0,72			
18	10	0,56			
18	9	0,50			
18	8	0,44			

Угловая скорость вращения подвижного датчика нуля поля должна быть постоянной и много меньше частоты напряжения, питающего электромагнит. Так как период напряжения питания $T_c = 0,02$ сек., то время на 1 оборот подвижного датчика можно взять 1 сек. (на 2 порядка меньше T_c). Электронное измерительное устройство должно иметь такое быстродействие, чтобы за время одного оборота успевать регистрировать поступающие сигналы, что вполне возможно.

С учетом времени, необходимого на установление переходных процессов, полное время измерения и анализа при такой системе будет не больше 1 мин. Следовательно, производительность процесса измерения и анализа ФН магнитного поля может быть увеличена почти в 100 раз. Одновременно применение датчика дает возможность значительно уменьшить погрешность измерения ФН из-за неточности установки датчика по азимуту.

Заключение

Теоретические и экспериментальные исследования компенсационного фазомагнетометра с подпиткой датчиков нуля поля позволяют сделать следующие выводы.

Наиболее важные технические характеристики прибора, точность и производительность процесса измерения уже не удовлетворяют возросшим требованиям бетатроностроения даже при значительном усовершенствовании метода измерения ФН. Для улучшения этих характеристик целесообразно разработать принципиально новые методы изме-

рения ФН без визуальной индикации момента компенсации путем применения средств электронной автоматики.

Изготовленный прибор и разработанная методика могут применяться для грубых оценочных измерений фазовой структуры магнитного поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. М. Ананьев и др. Индукционный ускоритель электронов-бетатрон. Госатомиздат, 1961.
 2. Л. М. Ананьев. Кандидатская диссертация. Томск, 1956.
 3. Ю. К. Петров. Фазовый магнетометр. Научный отчет НИИ ЯФЭА при ТПИ, 1961.
 4. Г. М. Тумайкин. Пермалловый магнетометр. Научный отчет НИИ ЯФЭА при ТПИ, 1961.
 5. Г. М. Тумайкин и др. Тр. IV Межвузовской конференции по электронным ускорителям, Изд. «Высшая школа». М., 1964.
 6. К. П. Яковлев. Математическая обработка результатов измерений. ИТТЛ, 1950.
 7. Извещение о регистрации № 32-58120. Компенсационный фазомагнетометр, 1966.
-